

## 暴風樣相에 따른 海溢의 數值解析的 特性

강주환\*

### 1. 서론

열대성 저기압에 의해 발생하는 태풍 또는 폭풍은 주변해역에 평균수위상승(setup)을 유발하며 진행하게 된다. 우리나라에는 주로 하절기에 남태평양에서 발생한 태풍의 영향을 받아 해일 등의 피해를 입게 되는데, 이러한 해일은 여러가지 수위상승효과가 복합된 결과이다. 즉, 폭풍 도착전 발생하는 초기수위상승(initial setup), 저기압 중심 주변의 급격한 압력경사에 의한 수위상승(pressure setup), 폭풍의 진행속도가 발생된 파의 속도에 근접할 경우 압력차에 의한 수위상승이 더욱 증폭되는 장파수위상승(long wave setup), 바람과 바다 마찰에 의한 수위상승(wind and bottom stress setup), Coriolis힘에 의한 수면상승(Coriolis setup) 등 여러가지 효과에 의해 해일이 발생하게 된다. 이 중 바람에 의한 효과가 가장 지배적인 것으로 알려져 있는데 경우에 따라서는 장파수위상승을 비롯한 여타 요소가 큰 영향을 미치는 경우도 간혹 있게 되므로 정확한 해일예측을 위해서는 이들 요소를 모두 고려한 복합적인 연구가 필요하지만 본연구에서는 이 중 가장 중요한 요소인 바람에 의한 영향만을 고려하였다.

폭풍이 발생하면 바람에 의한 전단응력을 받게 되어 수면경사가 생기고 그에 따라 흐름이 야기되는 동시에 인근 해안의 수위가 상승하여 해일을 유발하게 된다. 이러한 현상은 풍속과 지속기간, 그리고 해역의 크기 등의 영향을 크게 받게 되는데, 이러한 요소들의 크기가 증가할수록 해일의 규모도 커지게 되지만 어느 한도 이상 되면 중력과 저면 마찰력에 의해 해일의 성장이 둔화된다. 본연구의 목적은 각 요소들이 해일의 성장에 어떠한 영향을 미치는가를 수치해석적 방법으로 규명하여 실제문제 해결을 위한 지침을 제공하는데 있다.

---

목포대학교 토목공학과 (Department of Civil Engr., Mokpo National University, Muan-Kun, Cheonnam, 534-729, Korea)

## 2. 수학적모형

조석, 해일, 그리고 쓰나미 등과 같이 파장이 상당히 긴 경우 상대수심이 작게 되어 소위 천수방정식으로 해석을 하게 된다. 본연구에서도 식(1)과 같은 연속방정식과 식(2)와 식(3)과 같은 관성항, 중력항, 바닥 및 수면마찰항, 그리고 Coriolis항 등이 고려된 운동방정식으로 구성된 수심적분 2차원 천수방정식을 지배방정식으로 선택하였다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_{bx}}{\rho H} - \frac{\tau_{sx}}{\rho H} - fv = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_{by}}{\rho H} - \frac{\tau_{sy}}{\rho H} + fu = 0 \quad (3)$$

여기서  $t, x, y$ 는 시간과 공간에 대한 독립변수,  $\eta$ 는 수면변위,  $u, v$ 는 각각  $x, y$ 방향 유속,  $H = \eta + h$ ,  $g$ 는 중력가속도,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $\tau_{bx}, \tau_{by}$ 는 바닥마찰응력,  $\tau_{sx}, \tau_{sy}$ 는 수면마찰응력,  $f = 2\omega(\sin \varphi)$ 는 Coriolis계수,  $\omega$ 는 지구의 자전각속도로  $7.28 \times 10^{-5} \text{rad/sec}$ 이며  $\varphi$ 는 위도이다.

두 개의 인접한 매질이 서로 다른 속도로 운동하고 있을 경우 빠른 속도의 매질로부터 에너지나 운동량이 느린 속도의 매질로 전달되어 속도가 증가한다. 이러한 현상은 물리학적으로도 상당히 복잡한 현상이지만 바닥과의 전단응력과 수면위에 바람이 불 경우 수면에 작용되는 전단응력은 각각 다음 식(4)와 식(5)와 같이 표현하는 것이 통상적이다.

$$\tau_{bx} = C_b \rho u (u^2 + v^2)^{1/2} \quad (4.a)$$

$$\tau_{by} = C_b \rho v (u^2 + v^2)^{1/2} \quad (4.b)$$

$$\tau_{sx} = C_s \rho_a W_x (W_x^2 + W_y^2)^{1/2} \quad (5.a)$$

$$\tau_{sy} = C_s \rho_a W_y (W_x^2 + W_y^2)^{1/2} \quad (5.b)$$

여기서  $C_b = g/C^2$ ,  $C = H^{1/6}/n$ ,  $n$ 은 Manning의 조도계수,  $W_x, W_y$ 는 각각  $x, y$ 방향 풍속,  $C_s = (1.1 + 0.0536W_{10})$ ,  $\rho_a$ 는 공기의 밀도( $\approx 1.2 \text{kg/m}^3$ ),  $W_{10}$ 은 10m 상공에서의 풍속이다.

## 3. 적용차분법

식(1)-(3)의 천수방정식을 풀기 위하여 도입된 차분법은 Wilders등(1988)의 방법을 준용하였는데, 매시간단계를 둘로 나누어 1단계에서는 연속방정식(1)을 양해법으로 차분하여 수면변위  $\eta$ 를 구하고 운동방정식인 식(2)와 식(3)을 음해법으로 차분하여  $u, v$ 를 각각 구하게 된다. 2단계에서는 식(1)을 음해법으로, 나머지를 양해법으로 차분하여 해를 구하며 질량보존을 위하여 반복법으로 해를 구한다. 1단계에서  $u$ 와  $v$ 를 구하는 경우와 2단계의  $\eta$ 를 구하는 경우에 완전 음해법이 도입되었기 때문에 각각에 대한 행렬식 (6)을 풀어야 한다.

$$[A]\{x\} = \{b\} \quad (6)$$

여기서  $[A]$ 는  $(n \times n)$ 행렬로서 오중대각행렬이며  $\{b\}$ 는  $(n \times 1)$ 벡터로 기지이고  $x$ 는  $(n \times 1)$ 으로 미지벡터이다. 이러한 행렬식은 CG(conjugate gradient)방법을 이용하여 곱셈연산만으로 이루어진 반복법을 사용하면 효율적으로 해를 구할 수 있다. 그러나 CG방법은  $[A]$ 행렬이 대칭일 경우에만 수렴성이 보장되므로 본연구에 직접 적용될 수는 없으며 식(2)를 다음과 같이 변형시켜 대칭행렬로 만들어야 한다.

$$[A]^T[A]\{x\} = [A]^T\{b\} \quad (7)$$

이렇게 변형시키면 원래의 CG방법을 2번 적용한 것과 유사하게 되며 이러한 방법을 CGS방법이라 한다. 이러한 CGS방법은 비대칭행렬식에도 수렴성이 보장되지만  $[A]$ 행렬의 형태에 따라 수

렴속도는 크게 차이가 난다. 1단계의  $u, v$ 를 구할 경우 CGS방법의 적용은 수렴속도에 큰 문제점을 보이지 않고 있으나 2단계의  $\eta$ 를 구할 경우에는 수렴속도가 현저히 떨어지게 된다. 이러한 현상을 극복하기 위하여 preconditioned CGS방법을 도입하였다.

#### 4. 연구내용

천수방정식을 조석현상의 해석에 사용할 경우, 외해와 접한 개방경계에서 시시각각으로 변하는 조위가 영역 내부에서의 해면승강이나 흐름의 근원이 된다. 폭풍에 따른 해일의 경우는 이러한 조석에 더불어 기압차와 바람의 해면마찰력이 근원적인 힘이 된다. 본연구에서는 바람만의 영향에 대해서만 분석하였는데, 식(5)에 의해 해면상에 전단응력이 발생되면 이것이 유체내부의 점성에 의해 전유체를 움직이게 하는 근원력이 된다. 그러나 해일이 발달할수록 수면경사에 의한 반대방향의 중력과 바닥마찰력에 의하여 해일의 성장은 둔화된다. 식(5)에서와 같이 전단응력은 풍속의 제곱에 비례하므로 해일의 크기는 폭풍의 양상과 밀접한 관계가 있으므로 풍속과 지속기간, 바람이 부는 해역의 크기 등은 해일의 성장에 큰 영향을 미칠 것이다. 본연구에서는 이러한 폭풍양상에 대한 민감도분석을 통하여 실제문제 해결의 지침을 제공하고 이를 토대로 제주도 남쪽 해역의 해일발생을 수치적으로 모의하였다.

#### 5. 참고문헌

- 강주환, 박상현, 이길성, "음해법을 이용한 천수방정식의 수치해석", 대한 토목학회 논문집, 제13권, 제2호, 1993년 6월. (계재예정)
- Bayliss, A., C.I. Goldstein, and E. Turkel, "An Iterative Method for the Helmholtz Equation", J. of Computational Physics, Vol. 49, 1983.
- Panchang, V.G., B.R. Pearce, G. Wei, and B. Cushman-Roisin, "Solution of the Mild-Slope Wave Problem by Iteration", Applied Ocean Research, Vol. 13, No. 4, 1991.
- Pugh, D.T., Tides, Surges and Mean Sea-Level, John Wiley & Sons, 1987.
- Wilders, P., L. van Stun, G.S. Stelling, and G.A. Fokkema, "A Fully Implicit Splitting Method for Accurate Tidal Computations", Int. J. for Numerical Methods in Engineering, Vol. 26, 1988.